

Lichttechnische Eignungsprüfung von Retrofit-LEDs als Ersatz für Halogenglühlampen in Kfz-Scheinwerfern

Anil Erkan, M.Sc., Dr.-Ing. Jonas Kobbert, Dr.-Ing. Kiriakos Kosmas, Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Abstract

Die Licht-emittierende Diode (LED) gewinnt sowohl in der Haushalts- als auch in der Kfz-Beleuchtung stetig an Bedeutung. Der Umstieg von konventionellen Glühlampen zu LED-Leuchtmitteln erfolgt bereits seit einigen Jahren durch die Verwendung von sogenannten Retrofit-LEDs im Haushalt. Auch in der Kfz-Frontbeleuchtung wäre solch ein Wechsel technisch möglich. In Deutschland und Europa fehlen derzeit jedoch die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Zulassung von Retrofit-LEDs.

Dabei könnten sich durch die Verwendung von Retrofit-LEDs sowohl Vor- als auch Nachteile bezüglich der Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr ergeben. So könnte der mögliche höhere Lichtstrom und die kältere Lichtfarbe der Retrofit-LEDs zu einer höheren Leuchtweite und somit einer größeren Sichtbarkeitsweite führen. Diese Eigenschaften könnten jedoch ebenfalls für ein erhöhtes Blendpotential sorgen.

Mit der durchgeführten Untersuchung wird eine Aussage bezüglich der Sicherheitserhöhung im nächtlichen Straßenverkehr durch die Verwendung von aktuell verfügbaren Retrofit-LEDs getroffen. Hierfür werden sowohl photometrische Messungen im Labor als auch ein Feldtest durchgeführt und ausgewertet.

Index Terms: Kfz-Lichttechnik, Retrofit-LEDs, Messtechnik

1 Einleitung

Im Straßenverkehr stellt das visuelle System die Hauptinformationsquelle für den Kraftfahrzeugführer dar [1]. Dabei hat es die Aufgabe wichtige Informationen und Gefahren frühzeitig zu erkennen und zu verarbeiten. Hierfür ist eine geeignete Beleuchtungssituation von essentieller Bedeutung. Um diese Beleuchtungssituation bei Nacht zu erreichen, werden Beleuchtungssysteme wie Straßenleuchten und Kfz-Scheinwerfer verwendet. Die Frontscheinwerfer in Kraftfahrzeugen haben die Aufgabe die Fahrbahn vor dem Fahrzeug auszuleuchten und somit dem Fahrzeugführer eine hohe Sichtweite zu bieten. Hierzu sind in Scheinwerfern aktuell mindestens zwei



Lichtfunktionen integriert. Das Fernlicht für Fahrten ohne andere Verkehrsteilnehmer für eine maximale Sichtweite und das Abblendlicht um Gegenverkehr und vorrausfahrende Fahrzeuge nicht zu blenden. Um die Abblendlichtfunktion im Scheinwerfer zu realisieren, werden die optischen Elemente innerhalb des Scheinwerfers so optimiert, dass das vom Leuchtmittel emittierte Licht bei einer gewissen Sichtweite die Blendung des Gegenverkehrs auf ein Minimum reduziert. Dabei werden verschiedene Leuchtmittel in Scheinwerfern eingesetzt. Das am weiteste verbreitete Leuchtmittel ist die Halogenglühlampe. Laut einer statistischen Untersuchung im Jahr 2009 waren 80 % aller Fahrzeuge in Deutschland mit Halogenscheinwerfern ausgestattet [14]. Weitere Leuchtmittel sind Xenon-Lampen, LEDs sowie vereinzelt im Fernlichtbereich Leuchtstoff-konvertierte Laser.

Durch die stetige Weiterentwicklung der LED und ihrer höheren Effizienz im Vergleich zu Halogenleuchtmitteln steigt ihre Relevanz für Beleuchtungszwecke. Dies ist sowohl im Kfz-Bereich als auch im Haushalt zu beobachten [3]. Im Haushalt erfolgt der Umstieg von Halogenglühlampen auf LED-Leuchtmittel zum Teil durch sogenannte Retrofit-LEDs, LEDs die in den standardisierten Fassungen herkömmlicher Glühlampen eingesetzt werden können, wie in Abbildung 1 links angedeutet [4,13]. Diese Art des Wechsels von Halogen- auf LED-Leuchtmittel wäre durch bereits verfügbare Retrofit-LEDs im Kfz-Bereich ebenfalls möglich. Jedoch wird die Verwendung solcher LED-Leuchtmittel durch gesetzliche Regelungen verboten. In der ECE Regelung R 37 wird vorgeschrieben, dass der Glühfaden das einzige Element der Glühlampe sein darf, das Licht erzeugt und abgibt, wenn es unter Spannung gesetzt wird [2].



Abbildung 1: Glühlampen und die zugehörigen Retrofit-LEDs, während im Haushalt der Wechsel von Glühlampen auf Retrofit-LEDs bereits möglich ist, ist im Kfz-Bereich dieser Wechsel aufgrund gesetzlicher Regelungen untersagt [6, 9-12]

Dabei besteht die Möglichkeit, dass die Verwendung von Retrofit-LEDs in Kfz-Frontscheinwerfern zu einer höheren Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr führt, da durch einen potentiell höheren Lichtstrom eine höhere Leuchtweite erreicht werden könnte. Ebenfalls sind durch diese höhere Leuchtweite und die kältere Lichtfarbe bessere Detektionsmöglichkeiten vorstellbar [13]. Gleichzeitig könnten diese Eigenschaften der Retrofit-LEDs zu einem höheren Blendpotential führen. Um die Eignung der Retrofit-LEDs als Ersatz für Halogenglühlampen in Kfz-Scheinwerfern zu überprüfen, werden die Leuchtmittel zunächst photometrisch untersucht. Diese

Untersuchungen gliedern sich dabei in eine Betrachtung des Leuchtmittels und eine Betrachtung des Gesamtscheinwerfersystems, in das die Leuchtmittel eingesetzt werden, da sich hier durch die optischen Elemente wie Linsen bei einem Projektionscheinwerfer oder Reflektoren bei Reflektorscheinwerfern durchaus andere Effekte ergeben können.

2 Photometrische Betrachtung des Leuchtmittels

Für die photometrische Betrachtung wird eine Stichprobe von 17 Leuchtmitteln (6 Halogenleuchtmittel, 11 Retrofit-LEDs) mit H7-Sockel untersucht. Dabei werden verschiedene Ausführungsformen der erwerbbaaren Leuchtmittel betrachtet. Die verschiedenen Ausführungsformen der Halogenglühlampen sind in Abbildung 2 dargestellt.

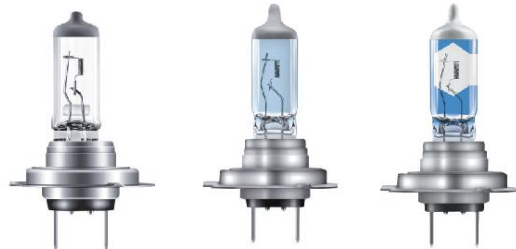


Abbildung 2: Standard-H7 Glühlampe (links), „Xenon-Effekt“-H7 Glühlampe (mittig), H7 Glühlampe „erhöhte Leuchtweite“ (rechts) [6-8]

Die verwendeten Retrofit-LEDs in Abbildung 3 unterscheiden sich ebenfalls in ihren Ausführungsformen. Sie unterscheiden sich sowohl in der Anzahl der genutzten Leuchtfächen als auch im Vorhandensein einer Kühlung sowie in der Nutzung von optischen Elementen.



Abbildung 3: Verschiedene Ausführungen von Retrofit-LEDs, v.l.n.r. Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen, Retrofit-LED mit vier Abstrahlrichtungen, Retrofit-LED mit sieben Abstrahlrichtungen, Retrofit-LED mit Reflektor- und Linsenanordnung.

Die photometrischen Labormessungen werden mit der durch die ECE Regelung R37 vorgeschriebenen Prüfspannung von 13,2 V durchgeführt [2].

2.1 Gesamtlichtstrom

Zur Bestimmung des Gesamtlichtstroms wird ein Nahfeldgoniophotometer verwendet. Hierbei wird der Photometermesskopf auf Kreisbahnen um das Leuchtmittel verfahren

und die winkelabhängige Beleuchtungsstärke gemessen. Anschließend wird integrativ der Gesamtlichtstrom bestimmt.

Die Halogenglühlampen weisen im Mittel einen Gesamtlichtstrom von 1522,10 lm auf. Die Standardabweichung beträgt 63,93 lm. Somit erfüllen die untersuchten Halogenleuchtmittel den von der ECE geforderten Wert von $1500 \text{ lm} \pm 10 \%$ [2]. Mit der durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 57,12 W ergibt sich eine Lichtausbeute von 26,65 lm/W. Der Gesamtlichtstrom bei den verschiedenen Retrofit-LEDs befindet sich in einem Bereich von 126,10 lm bis 2656,88 lm. Dabei fällt auf, dass die Retrofit-LEDs ohne Kühlung sehr geringe Werte für den Gesamtlichtstrom aufweisen. Es liegt die Vermutung nahe, dass diese LEDs falsch gekennzeichnet wurden und ursprünglich für Signaleinrichtungen gedacht sind. Daher werden diese Retrofit-LEDs im weiteren Verlauf nicht näher betrachtet. Außerdem ist auffällig, dass der Gesamtlichtstrom der restlichen Retrofit-LEDs deutlich höhere Lichtstromwerte von 2087,62 lm im Mittel erreichen und somit deutlich mehr Licht liefern als die Halogenglühlampen.

Durch die deutlich geringere Leistungsaufnahme von 29,8 W im Mittel erreichen die Retrofit-LEDs Lichtausbeuten von bis zu 88,96 lm/W. Damit wird die Annahme der höheren Effizienz der Retrofit-LEDs gegenüber den Halogenglühlampen bestätigt.

2.2 Lichtstärkeverteilungskurve (LVK)

In Abschnitt 2.1 wird deutlich, dass die Retrofit-LEDs teilweise einen deutlich höheren Gesamtlichtstrom aufweisen als die Halogenglühlampen. Neben dem Gesamtlichtstrom spielt jedoch die Lichtverteilung des Leuchtmittels eine entscheidende Rolle für die Verwendung in Kfz-Frontscheinwerfern.

Daher wird mit dem Nahfeldgoniophotometer die LVK der verschiedenen Leuchtmittel ermittelt. Als Referenz dient dabei die LVK der H7-Halogenglühlampe, die in Abbildung 4 dargestellt ist.

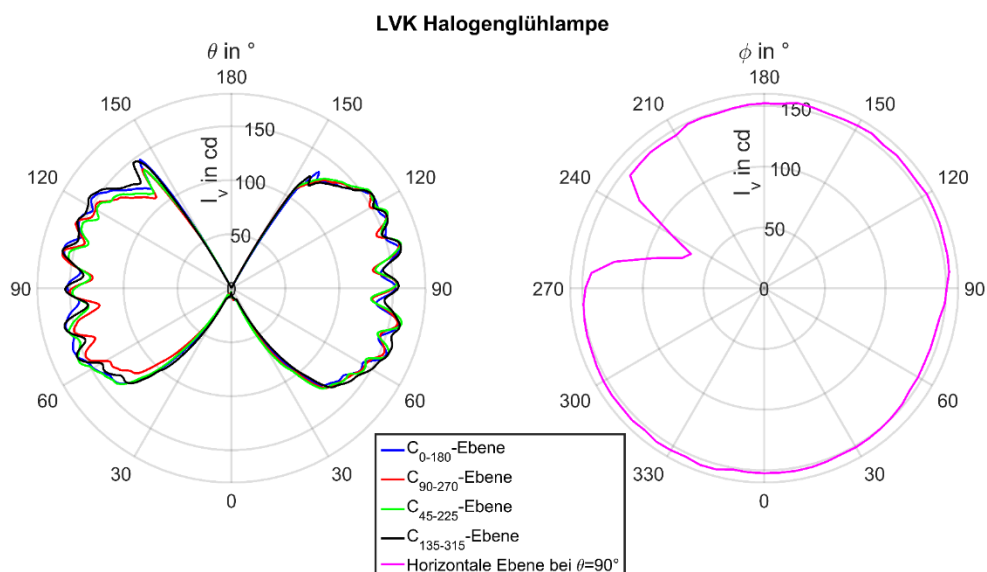


Abbildung 4: Lichtstärkeverteilung der H7-Halogenglühlampe

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, weist die H7-Halogenglühlampe eine nahezu rotationssymmetrische LVK auf. Diese hat lediglich einen Einbruch an der Stelle der Elektrodenführung (siehe Abbildung 4 rechts). Die Einkerbungen, die in Abbildung 4 auf der linken Seite zu sehen sind entstehen durch die Glühwendelwindungen.

Als nächstes wird eine Retrofit-LED mit zwei Leuchtflächen und damit zwei Hauptabstrahlrichtungen betrachtet. Die LVK dieser Retrofit-LED ist in Abbildung 5 dargestellt. Zum Vergleich ist die LVK der H7-Halogenglühlampe ebenfalls zu sehen.

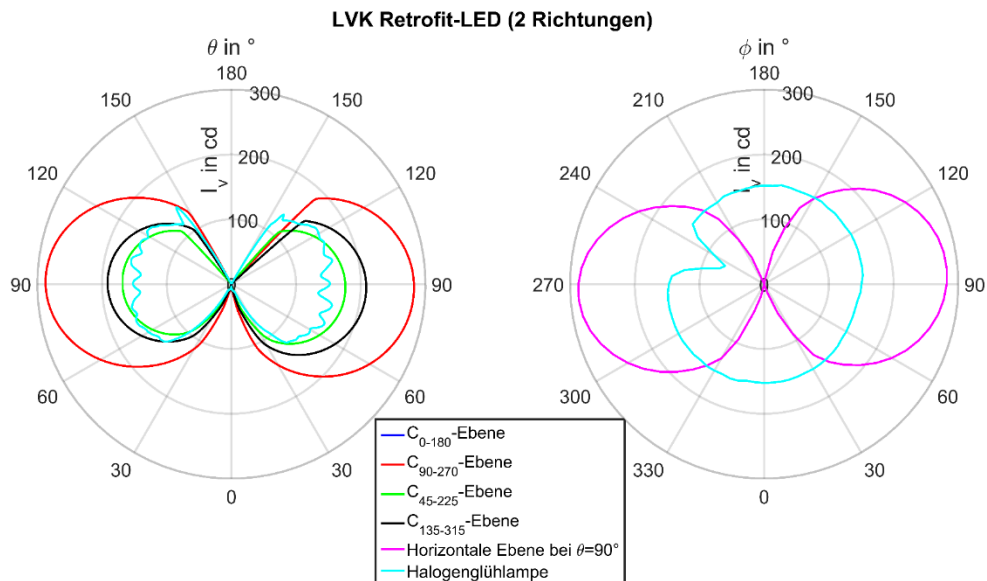


Abbildung 5: Lichtstärkeverteilung der Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen

In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass die Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen einen großen Raumbereich mit einer höheren Intensität ausleuchtet als die Halogenglühlampe. Auf der rechten Seite der Abbildung ist jedoch deutlich zu erkennen, dass Teilbereiche, die durch die Halogenglühlampe ausgeleuchtet werden, durch die Retrofit-LED nicht erfasst werden können. Dies könnte beim Einsatz im Scheinwerfer dazu führen, dass Teilbereiche auf der Fahrbahn deutlich heller und andere Bereiche auf der Fahrbahn kaum ausgeleuchtet werden.

Zuletzt wird die in Abbildung 6 dargestellte LVK der Retrofit-LED mit vier Abstrahlrichtungen betrachtet.

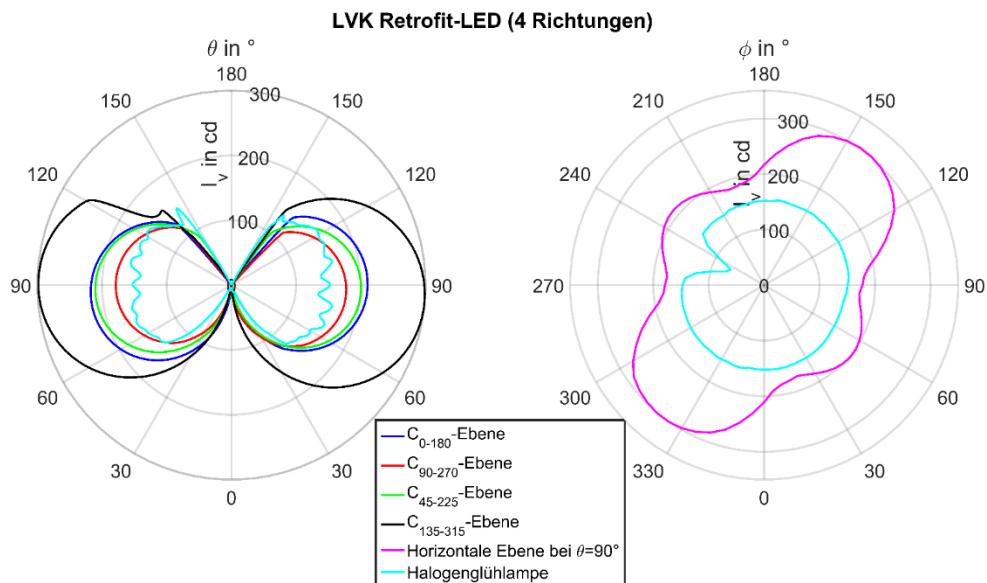


Abbildung 6: Lichtstärkeverteilung der Retrofit-LED mit vier Abstrahlrichtungen

Im Vergleich zur LVK der Retrofit-LED aus Abbildung 5 weist diese LVK in der horizontalen Ebene keine Lücken auf. Dies resultiert aus den zwei zusätzlichen Leuchtflächen. Es ist deutlich zu sehen, dass der gesamte durch die Halogenglühlampe ausgeleuchtete Bereich auch von der Retrofit-LED ausgeleuchtet wird. Zudem ist die Intensität der Retrofit-LED im ausgeleuchteten Bereich höher als die der H7-Halogenglühlampe. Dies sollte im Gesamtscheinwerfersystem dazu führen, dass die zu beleuchtenden Bereiche auf der Fahrbahn durch den Einsatz dieser Retrofit-LED mit einer höheren Intensität beleuchtet werden.

Um die aus der LVK-Betrachtung abgeleiteten Hypothesen zu überprüfen wird im nächsten Abschnitt die photometrische Betrachtung des Gesamtscheinwerfersystems vorgestellt und analysiert.

3 Photometrische Betrachtung des Gesamtscheinwerfersystems

Die photometrische Betrachtung des Gesamtscheinwerfersystems dient dazu die Auswirkungen der Leuchtmiteileigenschaften auf das Lichtbild des Frontscheinwerfers zu bestimmen. Hierzu wird die LVK des Gesamtscheinwerfersystems mit den verschiedenen eingesetzten Leuchtmitteln gemessen. Diese Messung wird sowohl mit Reflexions- als auch mit Projektionsscheinwerfern durchgeführt, da die Scheinwerfertechnologie neben dem verwendeten Leuchtmittel einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Lichtverteilung hat.

3.1 Reflexionssystem

Für die Untersuchung des Reflexionssystems wird ein Freiflächenreflektor-Scheinwerfer genutzt. Dies bedeutet, dass wie in Abbildung 7 dargestellt, jede Reflektorteilfläche für einen Bereich der LVK zuständig ist.

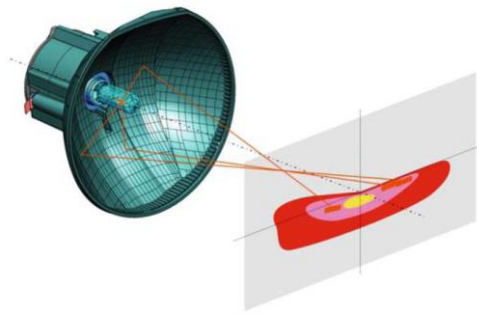


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Reflexionsscheinwerfers, jeder einzelne Reflektorbereich ist für die Ausleuchtung eines bestimmten Bereichs der Fahrbahn zuständig [5]

Für die Messung der LVK wird ein Kfz-Goniophotometer verwendet. Der Reflexionsscheinwerfer wird mit eingesetzter Halogenglühlampe eingestellt und bei einer Prüfspannung von 13,2 V die LVK bestimmt. Anschließend wird die Messung mit den eingesetzten Retrofit-LEDs wiederholt ohne dass der Scheinwerfer hierbei neu eingestellt wird. Dies wird explizit unterlassen um das Verhalten bei einfachem Leuchtmittelwechsel zu untersuchen. In Abbildung 8 sind die aufgenommenen LVKs dargestellt. Die LVKs mit den eingesetzten Retrofit-LEDs sind um bis zu $16,05^\circ$ nach links und $6,25^\circ$ nach oben verschoben. Ein einfacher Leuchtmittelwechsel ist somit definitiv nicht möglich. Für Darstellung in Abbildung 8 wurden die LVKs mathematisch korrigiert und neu ausgerichtet.

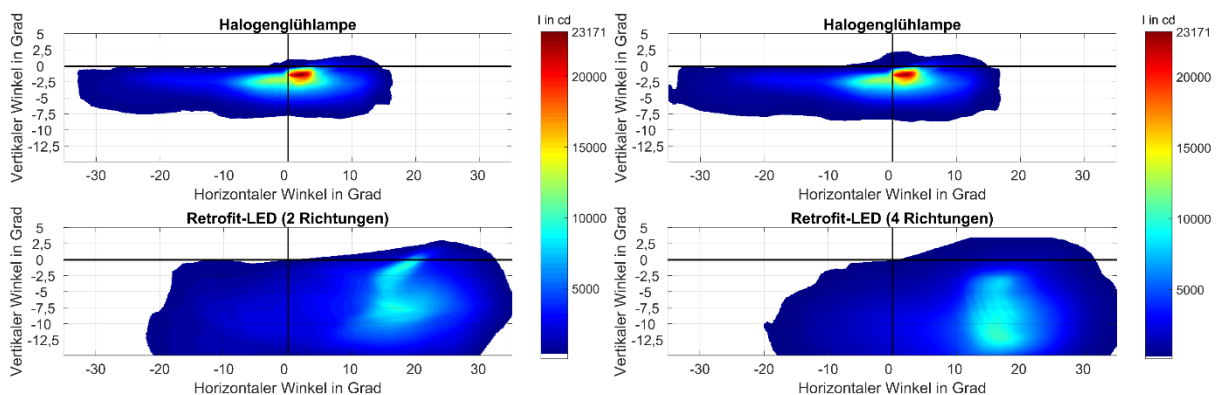


Abbildung 8: LVKs des Reflexionsscheinwerfers: Halogenglühlampe (oben), Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen (links, unten), mit vier Abstrahlrichtungen (rechts, unten)

Aus den in Abbildung 8 dargestellten LVKs wird deutlich, dass die Verwendung von Retrofit-LEDs mit starken Veränderungen des Scheinwerferlichtbilds einhergeht. So ist deutlich zu erkennen, dass die LVKs mit eingesetzten Retrofit-LEDs keinen „Hotspot“ aufweisen, wie es bei Verwendung der Halogenglühlampe der Fall ist (siehe Abbildung 8 oben). Außerdem wird deutlich, dass trotz höherem Lichtstrom die Maximalintensität der LVKs bei eingesetzten Retrofit-LEDs deutlich geringer ist als bei eingesetzter Halogenglühlampe. Diese beträgt bei der Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen

9879,5 cd (42,53 %), bei vier Abstrahlrichtungen 10298 cd (44,44 %) und bei der Halogenglühlampe 23171 cd.

Diese LVK-Messung hat gezeigt, dass ein deutlich höherer Lichtstrom und eine ausreichende Lichtverteilung der Retrofit-LED nicht ausreicht, um die gleiche Scheinwerferlichtverteilung zu erzeugen, wie eine Halogenglühlampe.

3.2 Projektionssystem

Das schematisch in Abbildung 9 abgebildete Projektionssystem beinhaltet im Vergleich zum Reflexionssystem eine zusätzliche Blende und eine Linse. Die Blende beinhaltet bereits die Form der Hell-Dunkel-Grenze, sodass die durch das Projektionssystem erzeugte Lichtverteilung für alle verwendeten Leuchtmittel eine vorgegebene Form erhält. Dies hat den Vorteil, dass bei Wechsel des Leuchtmittels keine größeren Verschiebungen des Lichtbilds auftreten.

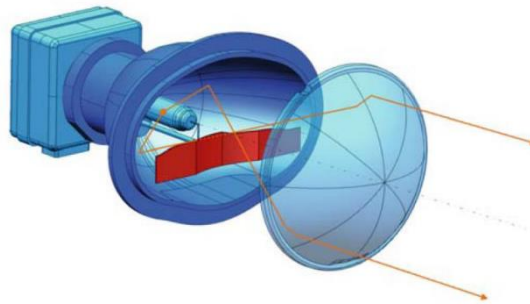


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Projektionsscheinwerfers, im Gegensatz zum Reflexionssystem wird die Form der Lichtverteilung durch den Einsatz einer Blende im zweiten Brennpunkt erzeugt [5]

Die Messung der LVKs wird analog zur Messung der LVKs des Reflexionsscheinwerfers durchgeführt. Die ermittelten LVKs sind in Abbildung 10 dargestellt.

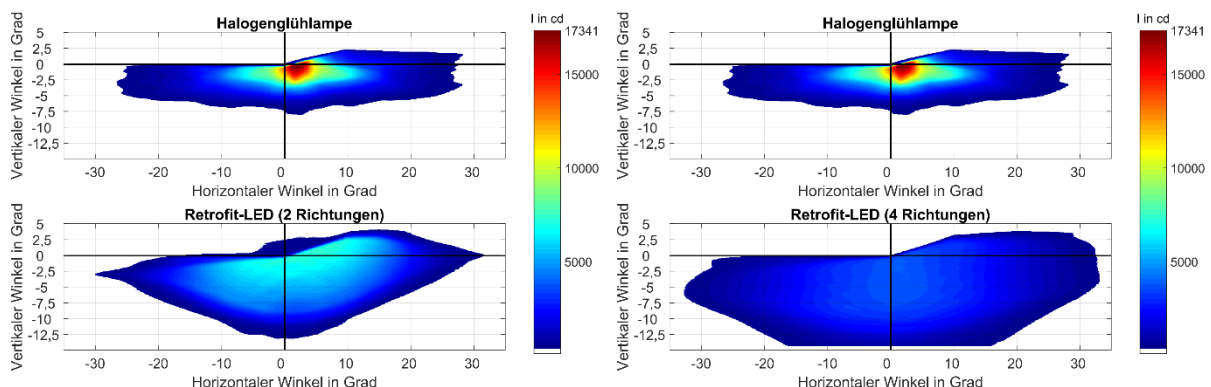


Abbildung 10: LVKs des Projektionsscheinwerfers: Halogenglühlampe (oben), Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen (links, unten), mit vier Abstrahlrichtungen (rechts, unten)

Aus den dargestellten LVKs wird deutlich, dass trotz Verwendung der Blende teilweise Licht in den Blendbereich gestreut wird (Abbildung 10 links unten). So ist zu erwarten,

dass die Verwendung von Retrofit-LEDs in Projektionssystemen zu einem erhöhten Blendpotential führt. Außerdem wird erneut deutlich, dass trotz des höheren Lichtstroms der Retrofit-LEDs die Maximalintensität der Lichtverteilung deutlich geringer ist als bei Verwendung der Halogenglühlampe. Diese beträgt bei der Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen 7486,2 cd (43,17 %), bei vier Abstrahlrichtungen 3897,4 cd (22,47 %) und bei der Halogenglühlampe 17341 cd.

Die Ergebnisse des Projektionsscheinwerfers zeigen ebenfalls, dass es neben der Lichtverteilung und des Gesamtlichtstroms der Leuchtmittel weitere Faktoren gibt, die für die Erzeugung einer geeigneten und nach ECE zulassungsfähigen Lichtverteilung essentiell sind.

Zur Bestimmung eines Faktors, der einen großen Einfluss auf die Lichtverteilung hat, werden die geometrischen Abmessungen der einzelnen Leuchtmittel genauer betrachtet. Dabei wird festgestellt, dass die Abmessungen der Halogenglühlampe in der ECE Regelung R37 genormt ist. So ist die Länge der Glühwendel und somit der leuchtenden Fläche auf 4,1 mm genormt. Der Abstand zwischen der Glühwendel und dem Lampensockel ist auf 25 mm genormt. Bei Betrachtung der Retrofit-LEDs fällt auf, dass keine der Retrofit-LEDs diese Abmessungen erfüllt. Der Vergleich der geometrischen Abmessungen ist in Abbildung 11 dargestellt.

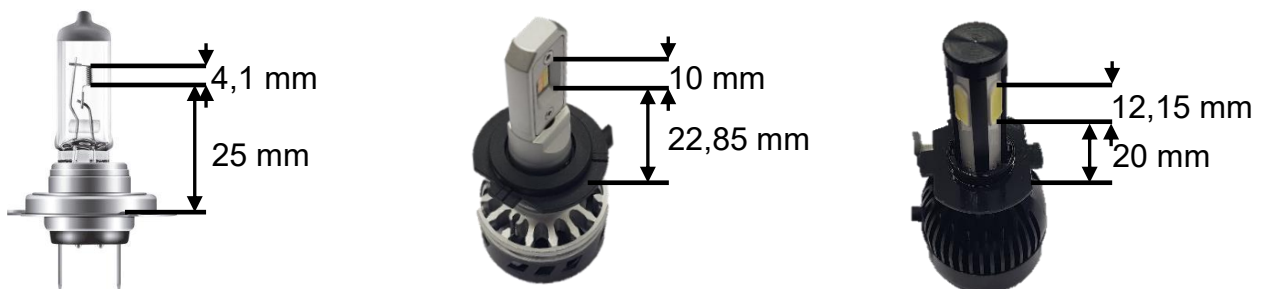


Abbildung 11: Vergleich der geometrischen Abmessungen der Halogenglühlampe mit den Retrofit-LEDs

Diese Abweichung von der genormten Geometrie sorgt dafür, dass die Lichtverteilung des Scheinwerfers deutliche Unterschiede aufweist. Dieser Einfluss entsteht dadurch, dass die Reflektoren und weitere optische Elemente auf diese genormte Geometrie der Halogenglühlampe rechnergestützt optimiert werden. In Abbildung 12 wird der Einfluss der Geometrieabweichungen auf die Lichtverteilung anhand einer Simulation eines einfachen Paraboloid-Reflektors und einer Punktlichtquelle verdeutlicht. Dabei wird die Punktlichtquelle einmal im Brennpunkt des Reflektors positioniert und anschließend entweder um 5 mm nach vorne oder nach hinten verschoben.

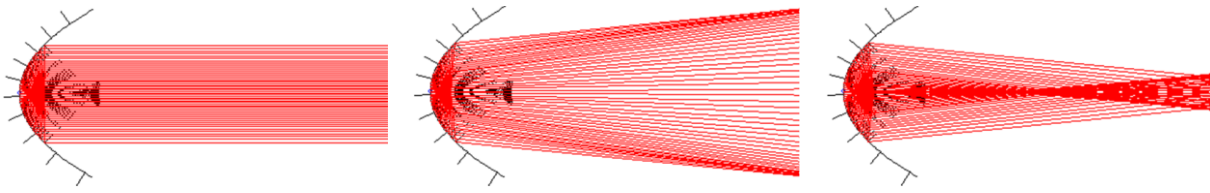


Abbildung 12: Strahlengang an einem Paraboloid-Reflektor, links: Lichtquelle befindet sich im Brennpunkt des Reflektors, mittig: Lichtquelle befindet sich zwischen dem Reflektor und dessen Brennpunkt, rechts: Lichtquelle hat einen größeren Abstand zum Reflektor als dessen Brennweite

Es ist zu sehen, dass die Positionierung der Lichtquelle im Brennpunkt des Reflektors zu einem parallelen Lichtaustritt aus dem Reflektor führt. Wird die Lichtquelle von diesem Brennpunkt entfernt divergieren oder konvergieren die Lichtstrahlen. Dies hat zur Folge, dass die Intensität des austretenden Lichtes bei größeren Entfernungen deutlich geringer sein wird.

4 Feldtest

In einem abschließenden Feldtest werden die Vermutungen des erhöhten Blendpotentials validiert. Hierzu wird der Projektionsscheinwerfer verwendet, da hier die Veränderung der Lichtverteilungsform vernachlässigbar ist.

Für die Durchführung des Feldtests wird ein Versuchsfahrzeug mit Projektionsscheinwerfern ausgestattet und mit insgesamt vier verschiedenen Leuchtmitteln verwendet. Dabei handelt es sich um zwei verschiedene Halogenglühlampen und zwei Retrofit-LEDs. Zur Bestimmung des relativen Blendpotentials wird in einem Messfahrzeug ein Photometerkopf auf Fahreraugenposition positioniert. Mit jedem Leuchtmittel werden 10 Versuchsfahrten mit 70 km/h durchgeführt und die Beleuchtungsstärke am Fahrerauge in Abhängigkeit des Abstandes gemessen. Die erhaltenen Beleuchtungsstärkeverläufe werden auf den Beleuchtungsstärkeverlauf der Standard-Halogenglühlampe normiert, um einen Vergleich anzustellen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.

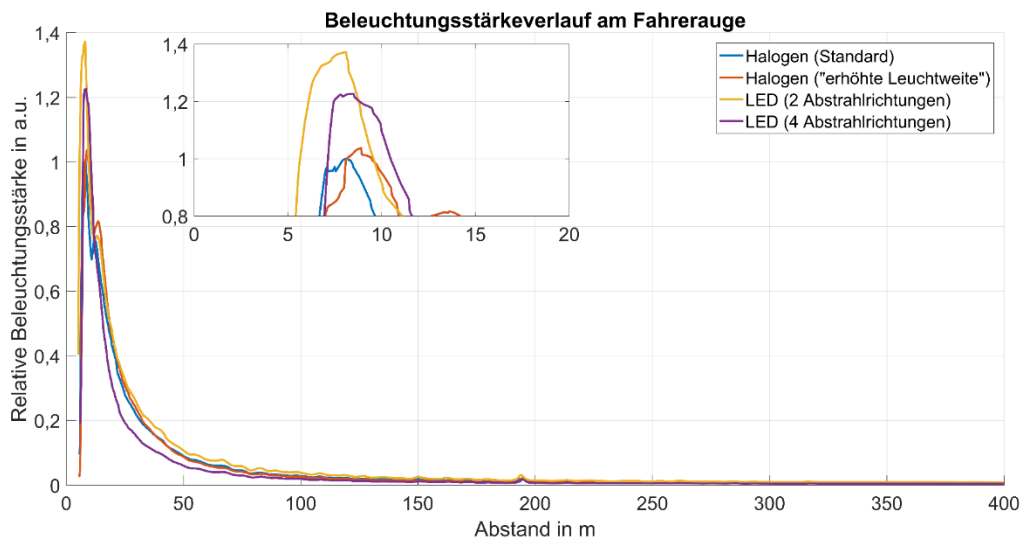


Abbildung 13: Gemittelte Beleuchtungsstärkeverläufe der vier Leuchtmittel bei einer Geschwindigkeit von 70km/h

Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Retrofit-LEDs eine 20 bis 40 % höhere Beleuchtungsstärke hervorrufen als die Halogenglühlampen. Dies bestätigt die Vermutungen aus den Laboruntersuchungen. Die Verwendung von Retrofit-LEDs führt zu einer relativen Erhöhung des Blendpotentials für den Gegenverkehr.

5 Fazit

Die durchgeführte Untersuchung hat gezeigt, dass bei der Verwendung aktuell verfügbarer Retrofit-LEDs keine Erhöhung der Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr gegeben ist und die Verwendung nicht zu empfehlen ist. Dies liegt an der geringeren Reichweite beim Einsatz im Gesamtscheinwerfersystem und an der Erhöhung des Blendpotentials im Vergleich zu Halogenglühlampen. Der Hauptgrund für diese Veränderungen des Scheinwerferlichtbilds ist die Abweichung in den geometrischen Abmessungen. Für eine Weiterentwicklung im Bereich der Kfz-Retrofit-LEDs ist die Einhaltung der genormten geometrischen Abmessungen essentiell.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Diem, Carsten: *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Fachgebiet Lichttechnik. 2004.
- [2] United Nations Economic Commission for Europe: *Regulation No. 37. Uniform provisions concerning the approval of filament lamps for use in approved lamp units of power-driven vehicles and of their trailers. Revision 8*. In: *Official Journal of the European Union*. 2015.

- [3] Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH: *Autoscheinwerfer: Das LED-Verbot*. <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/autoscheinwerfer-das-led-verbot-fuer-h7-gluehlampen-14430617.html>.
- [4] Jüstel, Thomas und Schwung, Sebastian: *Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz*. 1. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Spektrum, 2016. ISBN: 9783662484548. DOI: 10.1007/978-3-662-48455-5.
- [5] Khanh, Tran Quoc: *Optische Technologien im Kfz-Bereich - Folien zur Vorlesung*. Darmstadt, 2015.
- [6] OSRAM GmbH: *Produktdatenblatt 64210 OSRAM ORIGINAL LINE | Halogen-Scheinwerferlampen für Pkw*. 2018.
- [7] OSRAM GmbH: *Produktdatenblatt 64210CBI OSRAM COOL BLUE INTENSE | Halogen-Scheinwerferlampen für Pkw*. 2018.
- [8] OSRAM GmbH: *Produktdatenblatt NBL 64210NBL OSRAM NIGHT BREAKER LASER | Halogen-Scheinwerferlampen für Pkw*. 2018.
- [9] Philips: *Datenblatt: Classic LEDbulb/candle/luster E27/E14 Filament*. 2018.
- [10] Philips: *Datenblatt: Philips Halogen Classic Halogenlampe*. 2018.
- [11] Philips: *Datenblatt: Philips X-tremeUltinon LED*. 2018.
- [12] TÜV Rheinland: *LED-Retrofit am Auto - geht das? - TÜV Rheinland Mobilityblog*. <http://mobilityblog.tuv.com/led-retrofits/>. 2018.
- [13] Andreas Ueberschaer: *Lichtfarbe in der Straßenbeleuchtung*. Dissertation. Technische Universität Ilmenau und Der Andere Verlag GmbH.
- [14] Volkswagen: *Pressemitteilung: Lichttechnik - Sehen und gesehen werden*. In: ViaVision 08. 2011